

不同酶处理对黑米全粉凝胶特性的影响

韦剑思^{1,2}, 林莹^{1*}

(1. 广西工商职业技术学院, 广西南宁 530000) (2. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530000)

摘要: 该研究针对黑米全粉制成的凝胶产品吸水性差、口感粗糙、粘弹性不足等问题, 通过探索影响其凝胶特性的因素, 改善黑米凝胶产品的口感风味。该研究以黑糯米为原料, 以凝胶硬度、弹性、内聚性等为主要考察指标, 以添加蛋白酶(0~2%, m/m)、淀粉酶(0~2%, m/m)、脂肪酶(0~1%, m/m)、果胶酶(0~1%, m/m)、纤维素酶(0~1%, m/m)为单因素变量, 并作用于黑米全粉, 使体系在35%米浆质量分数、100℃煮制20 min、25℃下静置24 h后测定。研究表明: 随着酶添加量的增加, 淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶、脂肪酶作用使体系硬度分别下降39.56%~90.17%、15.68%~63.84%、20.76%~53.80%、0.70%~11.18%; 而果胶酶使体系硬度增加23.73%~59.09%, 且口感更细腻; 黑米凝胶受组份物质影响顺序为: 淀粉>蛋白>果胶>纤维素>脂肪。糊化试验发现, 以上酶的添加使体系峰值、谷值、终值粘度降低了0.4%~96.3%、2.68%~97.13%、1.8%~98.6%, 酶作用改善黑米全粉的食用品质。电镜扫描微观结果显示酶的添加中淀粉酶使微观结构表面孔洞的均匀性减弱, 碎片增加; 通过实验以为后续的黑米凝胶研究提供理论依据。

关键词: 黑米凝胶; 酶解; 质构; 粘度; 图谱; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2023)12-35-44

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.12.0253

Effects of Different Enzymatic Treatments on Gel Properties of Black Rice Whole Flour

WEI Jiansi^{1,2}, LIN Ying^{1*}

(1. Guangxi Vocational and Technical College of Industry and Commerce, Nanning 530000, China)

(2. College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530000, China)

Abstract: This paper addresses issues of poor water absorption, rough texture, and insufficient viscoelasticity of gel products from black rice whole flour. The factors affecting the gel properties were explored to improve the taste and flavor of black rice gel products. Black japonica rice was used as the raw material. Gel hardness, elasticity, and cohesion were used as the main indicators. The study employed single-factor enzyme variables, including protease (0~2%), amylase (0~2%), lipase (0~1%), pectinase (0~1%), and cellulase (0~1%). The increase in amylase, protease, cellulase, and lipase reduced the hardness of the system by 39.56%~90.17%, 15.68%~63.84%, 20.76%~53.80% and 0.70%~11.18%, respectively. Pectinase increased the hardness of the system by 23.73%~59.09%, resulting in a finer texture. The order of the components affected in the black rice gel was starch > protein > pectin > cellulose > fat. In the gelatinization experiment, the addition of the enzymes reduced the peak, valley, and final viscosity of the system by 0.4%~96.3%, 2.68%~97.13%, and 1.8%~98.6%, respectively. The enzymatic effect improved the edible quality of black rice flour. Electron microscopy scanning indicated that the addition of amylase weakened the uniformity of surface pores and increased the number of fragments in the microstructure. The study provides a theoretical basis for subsequent research on black rice gels.

Key words: black rice gel; enzymatic hydrolysis; texture; viscosity; charts; microstructure

引文格式:

韦剑思, 林莹. 不同酶处理对黑米全粉凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 35-44

WEI Jiansi, LIN Ying. Effects of different enzymatic treatments on gel properties of black rice whole flour [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 35-44

收稿日期: 2023-03-04

基金项目: 广西重点研发计划项目(2018AB45015); 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2023KY1400)

作者简介: 韦剑思(1988-), 女, 工程师, 研究生在读, 研究方向: 食品加工与安全、食品工艺控制、卫生管理, E-mail: 784700790@qq.com

通讯作者: 林莹(1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工, E-mail: 3263845487@qq.com

黑米表皮质地坚硬, 含有大量的果胶和纤维素等物质, 影响了黑米对水的吸收, 黑米粉制成的产品其凝胶性不强, 粘弹性不足, 吸水性较差, 导致产品粗糙感及硬度较强, 口感较差, 糊化时间较长, 限制其进一步开发利用, 因而高附加值产品较少。研究表明: 黑米的外皮层结构是影响其糊化特性的最主要因素; 黑米皮层致密的蜡质物质主要包括纤维素、果胶等, 使黑米难以煮烂、黏性较低, 由于皮层营养丰富, 也不宜除去, 针对此问题, 冯文娟等^[1]研究粒度对黑米粉的影响表明粒度越细越有利于糊化, 但在粒度相同的情况下, 利用酶解法酶解皮层物质较少研究。再者, 在现有的研究大米成分(主要是指蛋白质、淀粉、脂肪)对大米全粉凝胶影响中, 大多数都是采用直接加入蛋白、脂肪以及淀粉或者采用去除大米中的蛋白、脂肪、淀粉的方法来进行研究其成分对全粉凝胶的影响, 而采用酶解法的方式破坏降解本身所含有蛋白质、脂肪、淀粉等成分的方法鲜为少见。酶可以作用于底物并对底物进行催化分解, 从而影响物质原有的结构和性质。凝胶网络结构特性在酶的作用下可以改变, 从而进一步影响凝胶特性^[2]。本研究通过探究酶处理黑米中的蛋白、脂肪、淀粉、纤维素以及果胶物质后黑米全粉的凝胶特性的变化; 另外, 对于凝胶特性的探究, 多采用物性仪的TPA模式可测定硬度、弹性、粘聚性等, 而质构仪同时也可以测定剪切力和蠕变特性^[3], 本文将采用除了TPA模式外, 同时采用剪切程序和如编程序进行多角度衡量黑米的凝胶特性, 为黑米全粉凝胶特性的评价奠定基础, 为更高品质的黑米产品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料

样品黑粳米, 2022年, 产于广西巴马; 各项质量指标符合国家大米标准(GB 1354-2009)以及农业标准NY/T 832-2004黑米; 食品级淀粉酶、中性蛋白酶、脂肪酶, 河南万邦实业有限公司采购; 食品级纤维素酶、果胶酶, 河南万邦实业有限公司采购。

1.2 仪器

TMS-PRO 质构仪, 美国 Food Technology Corporation 公司; BLH-5601 锤式旋风磨, 浙江伯利恒仪器设备有限公司; HH-S6 数显恒温水浴锅, 江苏金怡仪器科技有限公司; F16502 扫描电镜, 荷兰 PHENOM 公司; RVA 快速粘度测定仪, Perten 波通仪器 RVA-4500 型; JY-20002 电子天平, 上海瞬宇恒平科学仪器有限公司; FA2204B 分析天平, 山东欧莱博医疗器械有限公司; DSC200PC 差示扫描量热仪, 德国耐驰仪器公司。

1.3 方法

1.3.1 黑米主要组分的测定

黑米中总淀粉含量的测定: 按照国标 GB 5009.9-2016 方法进行。黑米中直链淀粉含量的测定: 按照国标 GB/T 15683-2008 方法进行。黑米中蛋白质含量的测定: 按照国标 GB 5009.5-2016 方法进行。黑米中脂肪含量的测定: 按照国标 GB 5009.6-2016 方法进行。纤维素含量测定: 按照国标 GB/T 5515-2008 方法进行。果胶含量测定: 参照国标 NY/T 2016-2011 方法进行。

1.3.2 黑米全粉凝胶制备的工艺

凝胶制备: 参照周显青等^[4]的制备方法稍作修改, 分别将黑粳粘米和黑粳米置于锤式旋风磨中粉碎, 锤式旋风磨速度设置为 1 000 r/min, 磨成黑米粉后分别称取 35 g 黑米粉, 加 65 g 超纯水配制成米浆质量分数为 35% 的黑米浆, 将黑米浆于 85 °C 水浴中搅拌加热成悬浮液, 然后用玻璃棒边搅拌边分装转入铝盒磨具中, 在 95~100 °C 水浴加热 20 min 后, 取出后用保鲜膜覆盖, 置于恒温条件下存放一定时间即制得大米凝胶。

1.3.3 酶解作用单因素试验

按 1.3.2 的方法制胶, 以 35% 的米浆质量分数、100 °C、蒸煮 20 min、25 °C 下静置 24 h 为单因素试验的基础, 以添加蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶、果胶酶以及纤维素酶的量作为变量作用后再进行凝胶制备, 分别测定 5 种酶作用后对凝胶质构的影响。

表 1 酶单因素实验一览表

Table 1 Summary of enzyme single factor experiments

编号	酶品种	添加量/(%, 质量分数)	作用温度/°C	作用时间/h
1-0~1-5	蛋白酶	0、0.05、0.25、0.50、1、2	42~44	2
2-0~2-5	脂肪酶	0、0.05、0.25、0.50、1、2	42~44	2
3-0~3-5	淀粉酶	0、0.05、0.25、0.50、1、2	45~54	2
4-0~4-5	果胶酶	0、0.1、0.3、0.5、0.7、1	50~55	2
5-0~5-5	纤维素酶	0、0.1、0.3、0.5、0.7、1	45~54	2

表2 黑米全粉凝胶感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard of black rice powder gel

感官评价	得分	总体评价	评价标准
色泽	8.0~10.0	乐于接受	色泽均匀度较好、无杂色
	5.0~7.9	基本接受	色泽较均匀、少量杂色
	0~4.0	不接受	色泽不均匀,有较多杂色
气味	8.0~10.0	乐于接受	有黑米香,香味浓郁,无其他异味
	5.0~7.9	基本接受	米香较淡或稍有异味
	0~4.0	不接受	基本无米香味,有异味
黏弹性	8.0~10.0	乐于接受	黏弹性较好,不粘手,挤压能较快恢复
	5.0~7.9	基本接受	有点黏,轻微的粘手,挤压能恢复
	0~4.0	不接受	较黏,比较粘手或者弹性较弱,比较脆,挤压无法恢复
口感	8.0~10.0	乐于接受	口感柔和,有嚼劲、没有颗粒感,无酸味
	5.0~7.9	基本接受	口感较硬,有少许颗粒感,稍有酸味
	0~4.0	不接受	口感很硬,颗粒感较重,很重的酸味
质地	8.0~10.0	乐于接受	无分层,上下质地均匀,表面无裂痕
	5.0~7.9	基本接受	无分层,质地较均匀,有少许裂痕
	0~4.0	不接受	裂痕比较明显,组织不均匀,有分层

1.3.4 黑米全粉凝胶评价

1.3.4.1 黑米全粉凝胶感官特性表征

参照陈世龙^[5]的品评方法稍作改进,品评小组由5名经培训过的人员组成,品评标准如表2。

1.3.4.2 黑米全粉凝胶 TPA 质构测定

用质构仪进行测定,测定参数参照董越^[6]的方法并做修改。参数设定为:选 TPA 压缩模式,测试速度 60 mm/min,最大变形量 40%,压缩两次,力量感应元量程 50 N,探头选用 P/36R 柱形探头,起始力 0.075 N;样品脱模后成高 15 mm,直径为 28 mm 的圆柱体。

按 1.3.2 的方法制成凝胶后,将凝胶在室温下静置 24 h 后脱模测定,为了防止在测定过程中样品表面干硬化影响检测结果,将切割后的圆柱体用保鲜膜覆盖以防止水分蒸发。

1.3.4.3 黑米全粉凝胶剪切力测定

用质构仪进行测定,测定参数参照许金东等^[7]的方法。参数设定为:选剪切程序模式,测试前速度 120 mm/min,测试速度 60 mm/min,力量感应元 50 N,探头选用剪切探头,作用力为 5 N,起始力 0.075 N;测定最大剪切力。样品脱模后成高 15 mm,直径为 28 mm 的圆柱体。

按 1.3.2 的方法制成凝胶后,将凝胶在室温下静置 24 h 后脱模测定,为了防止在测定过程中样品表面干硬化影响检测结果,将切割后的圆柱体用保鲜膜覆盖以防止水分蒸发。

1.3.4.4 黑米全粉凝胶蠕变特性测定

用质构仪进行测定,参数设定为:选蠕变程序模式,

测试前速度 120 mm/min,测试中速度为 60 mm/min,测试后速度为 120 mm/min;最大变形量 50%,力量感应元量程 50 N,感应力选用 5 N,作用时间为 0.4 min,探头选用 P/36R 柱形探头,起始力 0.075 N;样品脱模后成高 15 mm,直径为 28 mm 的圆柱体。

按 1.3.2 的方法制成凝胶后,将凝胶在室温下静置 24 h 后脱模测定,为了防止在测定过程中样品表面干硬化影响检测结果,将切割后的圆柱体用保鲜膜覆盖以防止水分蒸发。

1.3.4.5 快速黏度测定仪 (RVA) 测试糊化特性

本试验所采用的程序参照武娜等^[6]的程序设定,具体为准确称取 3.0 g 黑米全粉,分别添加黑米全粉质量分数的 0、0.05%、1% 的酶与 25 mL 蒸馏水混合均匀后加入到 RVA 铝罐中开始测定。具体测定条件为:50 °C 保持 1 min;以 5 °C/min 升温至 95 °C (此过程需 9 min);在 95 °C 下保持 7 min;以 6 °C/min 的速度降至 50 °C (此过程 7 min);在 50 °C 下保持 4.5 min;旋转浆在前 10 s 为 960 r/min,之后保持在 160 r/min,整个过程约需 29 min。

1.3.4.6 电镜扫描观测微观结构

采用扫描电子显微镜进行微观结构的观察。由于凝胶黏性较大,故制成样品后蘸取一小块放在玻片上铺平成 1 mm 左右厚度的凝胶产品薄片,自然风干后用双面导电胶带固定在样品架上,用溅射涂布机涂金。在加速电压为 10 kV,放大倍数为 2 000 倍的情况下,使用扫描电子显微镜观察了凝胶样品的截面微观结构。

1.3.5 数据分析

数据以平均 (AVG) 标准差 (SD) 表示,每个处

理进行重复试验, 测试3次, 取平均值。所有数据采用SPSS 20.0统计软件进行分析, 以 ($P < 0.05$) 显著性水平进行均值方差分析。

2 结果与分析

2.1 酶作用对黑米全粉凝胶质构的影响结果分析

2.1.1 黑米全粉基本成分测定结果

表3 黑米基本成分测定结果

Table 3 Determination results of basic components of black rice

检验项目	检验结果 (粳型黑米)	检验结果 (籼型黑米)
淀粉含量/%	68.9±0.8	70.2±0.1
直链淀粉含量(以干基计, %)	17.3±0.1	13.5±0.1
蛋白质/%	8.17±0.02	9.02±0.04
脂肪/%	1.08±0.02	1.42±0.06
粗纤维素/%	2.31±0.02	2.62±0.09
果胶/(g/kg)	3.66±0.11	3.85±0.05

由表3可知, 两种黑米中, 黑米粳米的总淀粉的含量相对较低, 但直链淀粉含量却比较高, 两者基本成分中直链淀粉、支链淀粉差异显著, 这也可能

表4 添加0.5%的酶作用后凝胶感官评价得分

Table 4 Sensory evaluation score of gel after adding 0.5% enzyme

添加的酶种类(0.5%)	总体评价	色泽	气味	黏弹性	口感	质地
蛋白酶	8.1 ^a ±0.1	9.1±0.1 ^a	9.0±0.2 ^a	8.5±0.5 ^a	8.4±0.2 ^a	8.6±0.8 ^a
脂肪酶	8.5 ^a ±0.2	9.2±0.2 ^a	9.0±0.2 ^a	8.5±0.4 ^a	8.5±0.2 ^a	8.7±0.2 ^a
淀粉酶	7.8 ^b ±0.3	9.2±0.1 ^a	8.5±0.2 ^b	6.5±0.4 ^d	8.2±0.2 ^a	7.5±0.5 ^c
果胶酶	9.5 ^c ±0.1	9.1±0.1 ^a	9.0±0.8 ^a	9.5±0.2 ^b	9.0±0.2 ^b	9.2±0.8 ^b
纤维素酶	7.7 ^b ±0.2	9.0±0.2 ^a	8.4±0.1 ^b	7.5±0.2 ^c	7.5±0.2 ^c	8.5±0.4 ^a

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 质构仪测定酶作用黑米全粉凝胶质构单因素影响结果分析

2.2.1 蛋白酶作用影响分析

用质构仪测定所得数据如表5。在本实验黑粳米中, 按质量分数计测得蛋白质含量为8.17% (g/100 g, GB 5009.5-2016), 在干物质营养成分中属于第二大营养成分, 含量仅次于淀粉含量; 在大米粉中蛋白质主要包裹在淀粉表面或者填充在淀粉颗粒中^[8], 在实验范围内, 从质构测定结果来看, 加入一定量的蛋白酶作用后, 黑米凝胶的质构受到一定程度的影响, 从表5的1-0~1-5质构结果显示, 随着蛋白酶添加的量

导致凝胶性质差异的主要原因。

2.1.2 感官品评结果分析

制备所得黑米全粉凝胶外观如图1所示。品评得分如表4所示。

表4数据显示, 果胶酶添加后总体得分较高, 粘弹性显著由于其他组别, 质地更细致均匀, 口感较细腻。



图1 脱模前后成品图片

Fig.1 Pictures of finished products before and after demoulding

上升, 酶解蛋白程度上升, 蛋白酶添加量对黑米凝胶的硬度、胶粘性、咀嚼性、蠕变性能、咀嚼性影响显著 ($P < 0.05$), 呈下降趋势, 剪切力随着添加量的增加而下降; 而对内聚性、弹性影响不显著 ($P > 0.05$); 随着 0%~2%的添加量, 硬度依次下降了 15.68%、23.87%、37.68%、51.20%、63.84%; 这可能是由于蛋白酶的加入, 在前期 2 h 在最适温度下的反应阶段酶解了大分子蛋白, 蛋白酶作用于蛋白质, 可将其分解成小分子肽和氨基酸, 破坏了蛋白的空间结构, 使原来与淀粉分子相结合的蛋白颗粒脱离开来, 糊化所形成的网状结构不够牢固, 剪切后容易断裂^[9], 同时, 由于蛋白大分子被破坏降解, 使之在糊化过程与淀粉竞争吸水力下降, 对凝胶结构的三维网络形成作用削

弱。蛋白的存在对淀粉的糊化起保护作用,并且能提高其剪切耐受力,刘桃英等^[10]的研究结果说明,蛋白质确实对大米凝胶产生较大的影响,但其研究方法是添加不同含量的蛋白的形式测定,而况海锐等^[11]则采用去除大米中的蛋白的形式来研究蛋白成分对大米凝胶的影响,与本研究采用酶解法降解蛋白后对大米的影响由异曲同工之妙。随着蛋白质添加量的增加,弹性的变化幅度不大,两个峰值之间的差距逐渐减小,说明蛋白的酶解程度对体系的抗压性影响不大。而蠕变特性中达到所需力时的功没有呈现出规律的变化趋势。剪切力随着蛋白酶的量增大而减小,这也说明给予剪切作用时,分子链取向就会被拉直,由于蛋白酶作用酶解了蛋白,释放更多淀粉分子,破坏彼此相互间作用力导致缠结点逐渐减少,流动阻力降低,从而使表观黏度下降而使剪切力下降^[12]。

2.2.2 脂肪酶作用影响分析

在本实验黑粳米中,按质量分数计脂肪的含量为1.08% (g/100 g, GB 5009.6-2016),在干物质营养成分中属于第三大营养成分,含量仅次于蛋白含量;脂肪酶加入后,从表5的实验编号2-1~2-5的数据质构测定结果表明,脂肪酶的加入对黑米凝胶产生一定影响,但影响程度明显弱于蛋白酶的加入的影响程度;从数据可以看出加入脂肪酶后,硬度比未酶解组别低,随着加入量的增加,各项指标稍微呈下降趋势,但变化不明显,没有明显呈下降,这可能是脂肪含量过少,少量脂肪酶可以酶解大部分脂肪,再添加的情况下不能再酶解更多脂肪而导致添加量的增加未能引起质构的明显变化,数据显示,加入0.05%脂肪酶作用时,各指标与空白组变化不显著 ($P>0.05$);当添加至0.25%的量时,各指标与空白样相比变化显著 ($P<0.05$);随着0.05%~1%的添加量,硬度依次下降了0.70%、7.67%、7.37%、7.26%以及11.18%。

脂质与大米淀粉的结合有三种方式,第一种在淀粉颗粒表面,第二种在淀粉颗粒内部之间,第三种与淀粉结合紧密,难以除去,第一种结合方式下,游离脂质与在淀粉颗粒表面的蛋白容易形成复合物,但这种方式结合的脂质较容易去除,第二种结合方式在一定条件下也被去除。然而脂肪中包含脂肪酸,有脂肪酸的存在,在大米淀粉糊化过程中促进与淀粉形成淀粉-脂质结合物,影响淀粉的膨胀、分散、以及直链淀粉的溶解性,并在糊化后能与淀粉形成结晶结构为

V型的复合物^[13];因此,进行酶解后,其对淀粉的阻碍性减弱,使得凝胶的粘弹性受到影响,具体表现为质构中的硬度、弹性等指标略微下降。而蠕变特性中达到所需力时的功各指标相接近,差距不明显,也进一步说明了脂肪在黑米全粉中由于量过少所起的作用不明显。

2.2.3 淀粉酶作用影响分析

在本实验中,按质量分数黑粳米中测得淀粉的含量为68.9% (g/100 g, GB 5009.9-2016),其中,直链淀粉含量为(以干基计)17.3% (g, GB/T 15683-2008),在干物质营养成分中属于第一大营养成分;大米粉凝胶的硬度主要跟直链淀粉含量有关,呈正相关^[12],在黑米体系中也体现了类似的作用。淀粉酶的加入可以使淀粉大分子降解成小分子糊精,使直链淀粉含量大大降低,持水力下降,改变网络结构,同时,分子间、体系间相互作用力减弱,体系中自由水流动性加强。表5显示,硬度、胶粘性、弹性、咀嚼性等各指标变化显著 ($P>0.05$),作用效果明显强于脂肪酶以及蛋白酶;明显可以看出与蛋白酶及脂肪酶加入的区别,质构数据变化明显,包括剪切力下降明显;表5中实验编号3-1~3-5数据组结果表明,随着淀粉酶添加量的增加,硬度分别下降了39.56%、49.56%、69.51%、74.14%以及90.17%。在相同添加量的情况下,剪切力即质构数值变化最大,从蠕变特性数值看出达到5 N作用24 s时,随着淀粉酶的作用增加,需要做的功增加。这也进一步说明了大米凝胶主要依靠淀粉特别是直链淀粉的网络结构维持。而蠕变特性中达到所需力时的功没有呈现出逐渐变大的变化趋势,说明达到所需的力是体系的抗变形能力减弱较大,位移增加,耗费的功增大,反应了添加淀粉酶作用后黑米凝胶体系的韧性和抗屈服能力降低。这一结果进一步印证了淀粉酶能将淀粉颗粒降解为糊精等低聚糖分子,显著降低酶解液粘度,缩短糙米的蒸煮时间。

综上所述,蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶的添加都降低了黑米全粉凝胶的硬度,酶同时也是一种蛋白质,除了降解作用外,研究表明,添加蛋白也减少了大米淀粉凝胶不可流动水,可能是米蛋白对凝胶网络结构产生了一定的破坏^[15],同时,酶作用于三中大分子物质后,使体系内部的分子之间相互作用力减弱,导致缠结点逐渐减少,流动阻力降低,剪切力作用测定结果随添加量降低也进一步说明了此观点。

表 5 酶作用所得 TPA 质构、剪切程序及蠕变程序结果

Table 5 Results of the texture, shear program, and creep program of TPA obtained by enzymatic action

实验编号	添加量/%	硬度/N	最大粘附力/N	粘附性/(N·mm)	内聚性(Ratio)	弹性/mm	胶粘性/N	咀嚼性/mj	最大剪切力/N	达到所需力时的功(N·mm)
1-0	0	17.09±0.60 ^f	-5.20±0.34 ^e	29.63±0.20 ^a	0.52±0.16 ^a	7.22±0.55 ^a	8.82±0.13 ^a	63.64±4.20 ^a	3.97±0.20 ^a	6.00±0.38 ^d
1-1	0.05	14.41±0.40 ^e	-2.28±0.50 ^a	8.01±0.70 ^d	0.47±0.40 ^a	6.79±0.20 ^a	6.77±0.12 ^b	45.94±2.10 ^b	3.86±0.13 ^a	9.62±0.30 ^b
1-2	0.25	13.01±0.10 ^d	-1.97±0.13 ^a	6.92±0.28 ^e	0.45±0.00 ^a	6.65±0.30 ^a	5.79±0.20 ^e	38.37±1.50 ^e	3.55±0.13 ^{ab}	8.80±0.15 ^c
1-3	0.50	10.65±0.20 ^e	-3.21±0.30 ^b	17.09±0.50 ^b	0.49±0.01 ^a	6.33±0.15 ^a	5.26±0.07 ^d	33.35±2.53 ^d	3.31±0.10 ^b	11.43±0.10 ^a
1-4	1	8.34±0.01 ^b	-2.38±0.06 ^a	12.52±0.16 ^c	0.47±0.01 ^a	6.43±0.40 ^a	3.95±0.40 ^e	25.42±3.03 ^e	2.73±0.20 ^c	5.26±0.18 ^e
1-5	2	6.18±0.20 ^a	-2.03±0.30 ^a	12.70±0.20 ^c	0.50±0.05 ^a	6.75±0.20 ^a	3.08±0.20 ^f	20.80±1.15 ^f	2.38±0.50 ^e	9.57±0.40 ^b
2-0	0	17.09±0.50 ^{e2}	-5.20±0.50 ^{b2}	29.63±0.20 ^{a2}	0.52±0.00 ^{a2}	7.22±0.55 ^{a2}	8.82±0.17 ^{a2}	63.64±1.77 ^{a2}	3.97±0.30 ^{a2}	6.00±0.50 ^{a2}
2-1	0.05	16.97±0.20 ^{a2}	-4.69±0.30 ^{b2}	16.05±0.50 ^{a2}	0.32±0.02 ^{c2}	4.44±0.24 ^{a2}	5.37±0.50 ^{e2}	23.85±1.60 ^{a2}	4.90±0.29 ^{a2}	4.80±0.15 ^{b2c2}
2-2	0.25	15.78±0.20 ^{b2}	-5.08±0.50 ^{b2}	27.87±0.10 ^{b2}	0.43±0.01 ^{b2}	6.31±0.14 ^{b2}	6.80±0.15 ^{b2}	42.96±1.50 ^{c2}	4.89±0.10 ^{a2}	4.60±0.30 ^{a2}
2-3	0.50	15.83±0.15 ^{b2}	-3.32±0.50 ^{a2}	6.87±0.10 ^{f2}	0.26±0.02 ^{b2}	3.87±0.10 ^{f2}	5.11±0.66 ^{c2}	24.15±2.55 ^{d2}	4.26±0.40 ^{b2c2}	5.10±0.60 ^{b2c2}
2-4	1	15.85±0.14 ^{b2}	-3.60±0.30 ^{a2}	13.55±0.33 ^{e2}	0.33±0.00 ^{c2}	5.29±0.26 ^{c2}	5.16±0.39 ^{c2}	27.31±0.65 ^{d2}	4.83±0.15 ^{a2}	5.63±0.36 ^{ab2}
2-5	2	15.18±0.60 ^{b2}	-4.50±0.30 ^{b2}	26.95±0.25 ^{e2}	0.51±0.00 ^{a2}	7.26±0.51 ^{a2}	7.27±0.30 ^{b2}	52.75±1.60 ^{b2}	4.51±0.20 ^{b2c2}	4.57±0.20 ^{d2}
3-0	0	17.09±0.50 ^{b3}	-5.20±0.50 ^{b3}	29.63±0.15 ^{a3}	0.52±0.04 ^{b3}	7.22±0.55 ^{a3}	8.82±0.17 ^{a3}	63.64±2.20 ^{a3}	3.97±0.30 ^{a3}	6.00±0.50 ^{a3}
3-1	0.05	10.33±0.55 ^{b3}	-2.51±0.40 ^{b3}	7.06±0.60 ^{d3}	0.54±0.01 ^{b3}	5.38±0.50 ^{b3}	5.62±0.20 ^{b3}	30.01±0.50 ^{b3}	2.66±0.33 ^{b3}	6.13±0.50 ^{e3}
3-2	0.25	8.62±0.30 ^{c3}	-1.92±0.20 ^{b3c3}	9.05±0.50 ^{c3}	0.33±0.01 ^{d3}	5.58±0.30 ^{b3}	2.84±0.15 ^{d3}	15.87±1.10 ^{c3}	1.76±0.10 ^{c3}	8.30±0.50 ^{d3}
3-3	0.50	5.21±0.60 ^{d3}	-2.02±0.70 ^{b3c3}	13.46±0.20 ^{b3}	0.66±0.02 ^{a3}	3.43±0.13 ^{d3}	3.43±0.45 ^{c3}	11.79±1.20 ^{d3}	1.41±0.40 ^{c3d3}	12.07±0.50 ^{e3}
3-4	1	4.42±0.40 ^{d3}	-1.13±0.40 ^{ab3}	7.10±0.70 ^{d3}	0.45±0.01 ^{c3}	3.01±0.50 ^{d3}	1.98±0.20 ^{c3}	5.99±1.21 ^{c3}	0.94±0.26 ^{d3}	16.06±0.50 ^{b3}
3-5	2	1.68±0.20 ^{e3}	-0.64±0.03 ^{a3}	4.34±0.40 ^{e3}	0.48±0.00 ^{c3}	2.03±0.40 ^{e3}	0.82±0.13 ^{b3}	1.64±1.60 ^{b3}	0.41±0.03 ^{e3}	20.64±0.20 ^{a3}
4-0	0	17.09±0.82 ^{b4}	-5.20±0.12 ^{b4}	29.63±0.07 ^{a4}	0.52±0.00 ^{a4}	7.22±0.11 ^{d4}	8.82±0.11 ^{e4}	63.64±0.39 ^{e4}	3.97±0.42 ^{c4}	6.00±0.14 ^{a4}
4-1	0.1	24.56±0.52 ^{c4}	-2.90±0.08 ^{c4}	6.71±0.06 ^{a4}	0.29±0.04 ^{c4}	7.58±0.11 ^{c4d4}	7.00±0.23 ^{d4}	53.99±0.99 ^{b4c4}	5.52±0.14 ^{b4c4}	5.02±0.60 ^{a4}
4-2	0.3	26.11±0.13 ^{d4}	-4.46±0.21 ^{d4}	6.64±0.02 ^{a4}	0.30±0.00 ^{c4}	8.35±0.10 ^{c4d4}	7.71±0.17 ^{c4}	65.41±4.14 ^{b4c4}	5.69±0.18 ^{b4c4}	4.85±0.11 ^{a4}
4-3	0.5	28.55±0.56 ^{b4}	-2.46±0.09 ^{b4}	6.21±0.13 ^{b4}	0.27±0.01 ^{c4}	8.36±0.06 ^{b4}	7.81±0.18 ^{c4}	64.44±2.60 ^{b4c4}	6.12±0.34 ^{ab4}	4.87±0.11 ^{a4}
4-4	0.7	30.86±0.86 ^{a4}	-1.43±0.13 ^{a4}	6.73±0.04 ^{a4}	0.34±0.01 ^{b4}	9.02±0.11 ^{b4c4}	10.62±0.06 ^{b4}	94.64±3.72 ^{a4b4}	6.39±0.55 ^{a4}	4.23±0.10 ^{b4}
4-5	1	31.58±0.03 ^{a4}	-2.40±0.15 ^{b4}	5.64±0.06 ^{c4}	0.37±0.00 ^{a4}	9.08±0.03 ^{a4}	11.64±0.25 ^{a4}	106.10±1.60 ^{a4}	6.49±0.38 ^{a4}	3.66±0.12 ^{c4}
5-0	0	17.09±0.96 ^{b5}	-5.20±0.06 ^{b5}	29.63±0.08 ^{c5}	0.52±0.01 ^{b5}	7.22±0.11 ^{d5}	8.82±0.37 ^{a5}	63.64±0.29 ^{b5}	3.97±0.14 ^{a5}	6.00±0.17 ^{c5}
5-1	0.1	15.73±0.75 ^{b5}	-3.02±0.04 ^{d5}	14.79±0.74 ^{a5}	0.36±0.00 ^{a5}	5.65±0.05 ^{b5}	5.60±0.20 ^{a5}	31.57±1.37 ^{a5}	3.70±0.25 ^{b5}	5.01±0.21 ^{e5}
5-2	0.3	13.54±0.11 ^{c5}	-1.95±0.13 ^{b5}	5.93±0.84 ^{b5}	0.29±0.01 ^{b5}	4.18±0.09 ^{c5}	3.92±0.17 ^{ab5}	16.41±0.50 ^{b5c5}	3.64±0.08 ^{b5}	5.58±0.29 ^{d5}
5-3	0.5	12.33±0.68 ^{d5}	-2.96±0.13 ^{d5}	12.07±0.04 ^{b5}	0.40±0.04 ^{a5}	6.03±0.06 ^{a5}	4.92±0.17 ^{a5}	29.52±4.91 ^{a5}	2.96±0.13 ^{c5}	6.82±0.25 ^{c5}
5-4	0.7	9.37±0.63 ^{e5}	-2.28±0.06 ^{c5}	10.16±0.29 ^{c5}	0.35±0.01 ^{a5}	6.07±0.31 ^{a5}	3.31±1.67 ^{b5}	20.06±2.92 ^{b5c5}	2.98±0.11 ^{c5}	7.93±0.14 ^{b5}
5-5	1	9.17±0.59 ^{e5}	-1.63±0.04 ^{a5}	7.06±0.95 ^{d5}	0.30±0.04 ^{b5}	5.27±0.17 ^{c5}	2.74±0.26 ^{b5}	14.41±3.34 ^{c5}	2.01±0.32 ^a	9.08±0.25 ^{a5}

注：“1-X”为蛋白酶作用组，“2-X”为脂肪酶作用组，“3-X”为淀粉酶作用组，“4-X”为果胶酶作用组，“5-X”为纤维素酶作用组。不同字母+数字表示不同组内差异显著 (P<0.05)。

2.2.4 果胶酶作用影响分析

本实验的黑粳米中,测得果胶的含量为 3.66 g/kg (采用 NY/T 2016-2011 测定),由表 5 中实验编号 4-1~4-5 可知,果胶酶作用于黑米全粉体系后,随着 0.1%~1% 添加量的增加其体系硬度提升显著 ($P>0.05$),硬度分别增加 23.73%、31.54%、43.83%、55.47%以及 59.09%。这可能是由于果胶酶专一性较强,作用黑米皮层的果胶类物质,主要是指半乳糖醛酸等物质,使得皮层致密的坚硬结构被破坏,水能更容易进入体系内容,促进了体系与水的相互作用,更多的淀粉分子吸水膨胀,在糊化过程中能更充分的进行分子重排,加强了凝胶网络结构,从而使硬度提升较明显,从果胶酶的作用结果显示,随着果胶酶添加量的增加,黑米全粉体系硬度、内聚性、胶粘性、咀嚼性、剪切力等随着增大,蠕变功降低。这充分说明了黑米皮层的物质影响了黑米的糊化和凝胶,对皮层进行破坏可以改善黑米的蒸煮品质。

2.2.5 纤维素酶作用影响分析

本实验的黑粳米中,测得粗纤维的质量分数为 2.3% (以干基计,采用 GB/T 5515-2008 法测定),由

表 5 中实验编号 5-1~5-5 可知,纤维素酶作用后,随着纤维素酶添加量的添加,硬度分别下降了 20.76%、31.79%、37.88%、52.80%以及 53.80%,这表明体系结构变松散,硬度呈明显下降趋势,陈贞^[16]的研究说明了黑米表皮结构紧密,纤维素酶的结合位点很少,即使增加酶的用量,对酶解反应的影响也不显著。查阅相关资料显示,纤维素酶是一种多酶复合物,在作用纤维素、半纤维素的同时,可以促进植物细胞壁内溶物溶解出来并能将不易消化的大分子多糖、蛋白质和脂类降解成小分子物质有利于动物胃肠道的消化吸收。因此,硬度降低有可能是由于其把淀粉等物质进行了降解,造成淀粉含量降低从而影响了整个体系的吸水膨胀,跟前面淀粉酶、蛋白酶的作用结果效果类似。

2.3 快速黏度测定仪 (RVA) 测试酶作用黑米

全粉凝胶快速黏度单因素影响结果分析

快速黏度分析仪测定结果如表 6。用 RVA 对添加和未添加以及添加不同量的酶对黑米全粉做糊化特性分析,结果见表 6。

表 6 蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶与黑米全粉作用 RVA 测定结果

Table 6 RVA determination results of the interaction of protease, lipase and amylase with black rice flour

编号	添加量/%	出峰时间/min	峰值黏度/cp	谷值黏度/cp	崩解值/cp	终黏度/cp	回生值/cp	糊化温度/℃
蛋白酶	0	10.8±0.0 ^{a1}	1 530±40 ^{a1}	559±27 ^{a1}	971±13 ^{a1}	1 440±40 ^{a1}	881±13 ^{a1}	66.6±0.1 ^{a1}
	0.05	10.8±0.0 ^{a1}	1 097±66 ^{b1}	382±22 ^{b1}	695±24 ^{b1}	1 000±70 ^{b1}	618±48 ^{b1}	66.3±0.1 ^{b1}
	0.5	10.4±0.1 ^{b1}	750±50 ^{c1}	190±20 ^{c1}	560±30 ^{c1}	540±20 ^{c1}	350±0 ^{c1}	66.3±0.1 ^{b1}
	1	9.5±0.0 ^{c1}	595±5 ^{d1}	77±3 ^{d1}	518±2 ^{d1}	191±9 ^{d1}	114±6 ^{d1}	66.2±0.1 ^{b1}
脂肪酶	0	10.8±0.0 ^{a2}	1 530±40 ^{a2}	559±27 ^{a2}	971±13 ^{a2}	1 440±40 ^{a2}	881±13 ^{a2}	66.6±0.1 ^{a2}
	0.05	10.8±0.0 ^{a2}	1 524±34 ^{a2}	544±24 ^{a2}	980±10 ^{a2}	1 412±14 ^{a2}	868±10 ^{a2}	59.8±0.5 ^{b2c2}
	0.5	10.4±0.0 ^{b2}	1 212±32 ^{b2}	250±20 ^{b2}	962±12 ^{a2}	790±10 ^{b2}	540±10 ^{b2}	60.6±0.6 ^{c2}
	1	9.9±0.1 ^{c2}	549±49 ^{c2}	79±9 ^{c2}	470±40 ^{b2}	267±17 ^{b2}	188±8 ^{c2}	61.2±0.5 ^{b2}
淀粉酶	0	10.8±0.0 ^{a3}	1 530±40 ^{a3}	559±27 ^{a3}	971±13 ^{a3}	1 440±40 ^{a3}	881±13 ^{a3}	66.6±0.1 ^{a3}
	0.05	9.7±0.1 ^{b3}	332±19 ^{b3}	68±8 ^{b3}	264±11 ^{b3}	168±11 ^{b3}	100±13 ^{b3}	62.3±0.1 ^{c3}
	0.5	8.0±0.1 ^{c3}	168±23 ^{c3}	45±5 ^{b3}	123±18 ^{c3}	103±5 ^{c3}	58±3 ^{c3}	62.3±0.1 ^{b3}
	1	6.1±0.1 ^{d3}	56±2 ^{d3}	16±1 ^{c3}	40±2 ^{d3}	20±1 ^{d3}	4±0 ^{d3}	63.9±0.1 ^{b3}
果胶酶	0	10.8±0.0 ^{a4}	1 530±40 ^{a4}	559±27 ^{a4}	971±13 ^{a4}	1 440±40 ^{a4}	881±13 ^{a4}	66.6±0.1 ^{a4}
	0.3	10.7±0.0 ^{a4}	1 286±56 ^{b4}	481±14 ^{b4}	805±42 ^{b4}	1 314±16 ^{b4}	833±2 ^{b4}	64.5±0.5 ^{b4}
	0.5	10.7±0.1 ^{a4}	1 122±22 ^{c4}	413±33 ^{c4}	709±11 ^{c4}	1 230±20 ^{c4}	817±7 ^{b4}	64.8±0.5 ^{a4b4}
	0.7	10.7±0.1 ^{a4}	1 000±20 ^{d4}	353±8 ^{d4}	647±12 ^{d4}	1 132±34 ^{d4}	779±26 ^{c4}	64.5±0.1 ^{b4}
纤维素酶	0	10.8±0.0 ^{a5}	1 530±40 ^{a5}	559±27 ^{a5}	971±13 ^{a5}	1 440±40 ^{a5}	881±13 ^{a5}	66.6±0.1 ^{a5}
	0.3	10.1±0.1 ^{b5}	720±34 ^{b5}	140±16 ^{b5}	580±34 ^{b5}	466±16 ^{b5}	326±10 ^{b5}	61.8±0.2 ^{b5}
	0.5	10.1±0.0 ^{b5}	520±30 ^{c5}	80±13 ^{c5}	440±27 ^{c5}	248±11 ^{c5}	168±5 ^{c5}	62.1±0.1 ^{b5}
	0.7	10.1±0.0 ^{b5}	423±25 ^{d5}	59±9 ^{c5}	364±16 ^{d5}	159±11 ^{d5}	100±4 ^{d5}	61.9±0.1 ^{b5}

注: 不同字母+数字表示不同组内差异显著 ($P<0.05$)。

糊化特性与水结合能力有关^[17]。在加热升温过程中,粘度首先随着温度快速提升而快速增大,在温度升至 95 ℃时增大到最大值(除了 1%添加淀粉外)当继续维持最高温度时,粘度逐渐下降趋势。当温度逐渐下降时,粘度降低到一定程度后又逐渐上升。可能是由于黑米全粉体系中的淀粉颗粒起到主导作用,由于淀粉颗粒主要是由单一的淀粉分子结构通过氢键结合而成的颗粒结构,在水中受热后,氢键强度减弱,作用力减弱水分子逸进颗粒内部,导致颗粒可以大量吸水后膨胀,使黏度上升并达到最大值,继续受热则氢键断裂,颗粒破裂,直链淀粉大量析出,黏度下降^[16]。在随后的冷却降温过程中,伴随着温度的降低,直链淀粉分子排列趋于有序化,链与链之间的氢键进一步形成,黏度上升^[16]。

表 6 数据显示,酶的添加使体系峰值粘度、谷值粘度、终值粘度等下降显著($P>0.05$),与空白样品相比,0.05%~1%的蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶的添加使体系峰值粘度分别降低了 28.3%~61.1%、0.4%~64.1%、78.3%~96.3%,谷值粘度分别降低 31.66%~86.22%、2.68%~85.86%、87.85%~97.13%,终值粘度分别降低 30.5%~86.7%、1.9%~81.4%、88.3%~98.6%;而 0.3%~0.7%的果胶酶、纤维素酶的添加,与空白样品相比,粘度分别降低了 15.9%~34.6%、52.9%~72.4%,谷值粘度分别降低 13.95%~36.85%、74.9%~89.44%,终值粘度分别降低 1.8%~21.4%、67.6%~89.0%;峰值粘度越高,食用品质越差^[55],此结果说明了在一定量的酶添加时可以改善黑米全粉的蒸煮和食用品质,酶的添加有可能使体系结合水的能力变差;也有可能是酶的加入使得酶与体系的黑米中的淀粉及各组分竞相吸水,导致黑米中淀粉吸水膨胀变少,粘度下降。

糊化温度显示,黑米全粉对照组的糊化温度为 66.6 ℃,添加酶作用后糊化温度降低,说明酶的酶解作用加速了体系的溶胀,颗粒之间剪切力加强,加速了粘度增加的现象;酶的添加在一定程度加速了出峰时间,其中,添加了 1%的淀粉酶出峰时间最快,峰值粘度最低。

表 6 数据显示,酶添加导致回生值下降 1.47%~99.5%,崩解值下降 1.13%~95.8%。其可能是因为酶解阻碍了直链淀粉通过氢键排列有序的凝胶结构及降低了直链淀粉有效含量^[62]。回生值常用来表征凝胶类食品冷藏中的稳定性和老化趋势,回生值越小,表明冷糊稳定性越强,抗老化越强^[63]。崩解值反应了淀粉的

热糊稳定性,崩解值越小热糊稳定性越好;说明添加一定的酶作用于体系,体系的热糊稳定性及抗老化有所改善。

2.4 黑米全粉凝胶电镜扫描结果分析

采用扫描电子显微镜进行微观结构的观察。分别观察了黑米全粉、黑米全粉凝胶以及添加了三种酶作用后的凝胶样品,表面微观结构如图 2 所示。

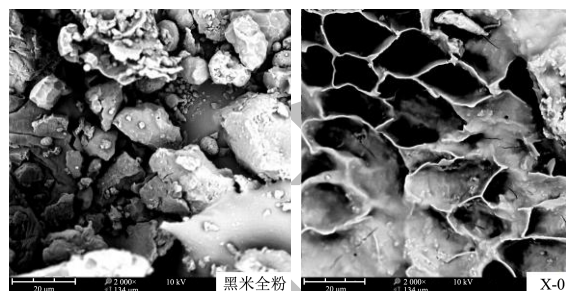


图 2 未添加酶作用黑米全粉及黑米全粉凝胶 SEM 图

Fig.2 SEM diagram of black rice whole powder and black rice whole powder gel without adding inactive black rice whole powder

注: X-0 代表不添加酶作用的凝胶样品微观结构。

黑米全粉形成凝胶后,表面均形成网络状孔洞结构及片状结构;从添加与不添加酶作用对比来看,不添加为图 2 右图 X-0,添加蛋白酶为图 3 第二排 1-1 至 1-5 系列,添加脂肪酶为第三排 2-1 至 2-5 系列,添加淀粉酶为第四排 3-1 至 3-5 系列;添加果胶酶为第五排 4-1 至 4-5 系列;添加纤维素酶为第六排 5-1 至 5-5 系列;从 1-1 至 1-5 系列可以看出,添加蛋白酶的量越大,孔洞的均一性变弱,尤其的加到 2%变化较明显,凝胶表面比较粗糙,网络凝胶结构均一性较差,孔洞大小不一,这说明蛋白酶的作用对黑米全粉凝胶存在影响;在脂肪酶作用下,从 2-1 至 2-5 系列表面微观结构变化不明显,从而也说明脂肪酶作用下,其对黑米凝胶的影响程度弱于蛋白酶;在淀粉酶作用下,从 3-1 至 3-5 系列可以看出,影响程度大于蛋白和脂肪,添加 2%的淀粉酶作用后凝胶微观表面孔洞的均一性也变弱,片状结构比较凌乱,有许多小碎片和小颗粒重叠或凸起,不能连成片,有可能是淀粉结构被破坏后凝胶的网络结构也破坏比较多而产生的影响;纤维素酶添加与淀粉酶添加有类似的作用效果;而果胶酶的添加加强了凝胶网络结构,可以观察到微观结构表面孔洞比较均一,孔洞深度较深,说明凝胶结构致密均匀。

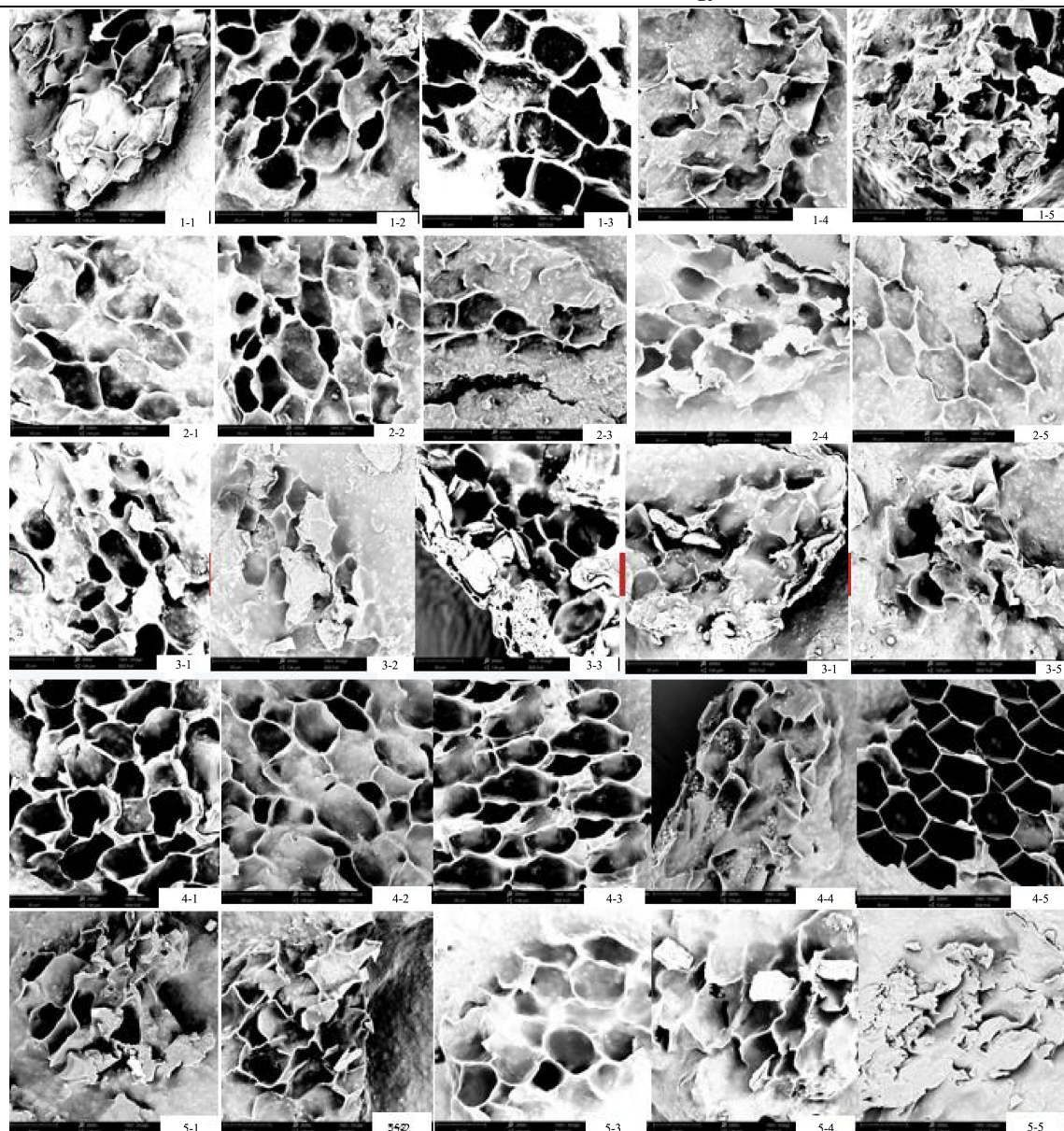


图3 不同酶作用的黑米全粉凝胶 SEM 图

Fig.3 SEM diagram of black rice whole powder gel with different enzymes

注：“1”至“5”分别代表蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶、果胶酶和纤维素酶作用组，1-1 至 1-5 分别代表酶由少到多。以上图片显示空洞大小尺寸为 10~18 μm 之间。

3 结论

本实验通过研究黑米全粉中的主要物质对其凝胶特性的影响，结果表明：随着添加量的增加，淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶、纤维素酶作用使体系硬度下降；果胶酶作用相反，体系硬度得到加强（提升 23.73%~59.09%）且口感更细腻；按照硬度变化范围及大小排序，黑米凝胶受物质影响大小顺序依次为淀粉 > 蛋白 > 果胶 > 纤维素 > 脂肪。果胶酶酶解黑米皮层结构能促进淀粉溶出，加强了体系的吸水膨胀，使体系相更连续更均匀，可以改善黑米的食用品质。

通过糊化试验显示，酶的添加使体系峰值粘度、谷值粘度、终值粘度、崩解值、回生值不同程度的下降，且添加量越大下降越显著。酶的添加可以改善黑米全粉的食用及蒸煮品质，添加酶后其热糊及冷糊稳定性得到加强，起到抗老化的作用。添加酶处理后特别是淀粉酶处理后，与未添加酶处理组相比，其类蜂窝状网络结构均一性减弱；果胶酶添加加强了凝胶结构的致密性、均一性和连续性。

研究结果为黑米凝胶的品质改善提供了更为简单和绿色的酶解途径，也为进一步探索黑米的理化性质提供了重要参考。

参考文献

- [1] 冯文娟,马森,孙冰华,等.粒度对黑米粉及其淀粉特性的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2022,43(2):1-8.
- [2] 胡燕,陈忠杰,赵思明.脂肪酶对大米凝胶特性的影响研究[J].中国食品添加剂,2011,2:129-135.
- [3] 张玉荣,周显青,郎凯红,等.剪切测试条件对大米凝胶特性测定结果的影响[J].粮食加工,2013,38(5):36-39.
- [4] 周显青,郎凯红,张玉荣等.大米凝胶特性测定中凝胶制备工艺参数研究[J].中国粮油学报,2014,29(6):1-5.
- [5] 陈世龙.大米凝胶的质构调控及抗老化研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [6] 董越.黑木耳全粉性质研究及其与κ-卡拉胶对黑米凝胶特性的影响[D].南昌:江西农业大学,2021.
- [7] 许金东,李云波,赵思明.籼米凝胶的压缩与剪切特性研究[J].中国农学通报,2007,5:109-114.
- [8] 武娜,杨杨,边鑫,等.可溶性大豆多糖对大米淀粉物化特性的影响[J].食品安全质量检测学报,2022,13(19):6140-6146.
- [9] 易翠平.籼米蛋白质影响其糊化特性的研究进展[J].粮食科技与经济,2014,39(5):57-58,69.
- [10] 刘桃英.大米蛋白对大米粉糊化性质的影响[J].食品工业科技,2013,34(2):97-103.
- [11] 况海锐,严奉伟,汪乐川,等.蛋白去除和亲水胶体添加对东北大米粉糊流变特性的影响[J].食品科技,2019,44(12):170-177.
- [12] Wang Y, Wang L J, Li D, et al. Effect of flaxseed gum addition on rheological properties of native maize starch [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(1): 87-92.
- [13] 黎焕波.脱脂脱蛋白对早籼米粉结构与性质及其关系的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
- [14] Irani M, Mandi R M A, Abdel Aal, et al. Viscoelastic and textural properties of canary seed starch gels in comparison with wheat starch gel [J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2019, 124(3): 270-281.
- [15] Zhang Y, Chen C, Chen Y, et al. Effect of rice protein on the water mobility, water migration and microstructure of rice starch during retrogradation [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91(JUN.): 136-142.
- [16] 陈贞.外源酶及预糊化改善黑米的食用品质研究[D].成都:西华大学,2019.
- [17] Adebowale A A, Sanni L O, Awonrin S O. Effect of texture modifiers on the physicochemical and sensory properties of dried fufu [J]. Food Science and Technology International, 2005, 11(5): 373-382.
- [18] Bhattacharjee P, Kulkarni P R. A comparative study on the physical characteristics and cooking quality parameters of commercial brands of Basmati rice [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2000, 51: 295-299.
- [19] Karim A A, Norziah M H, Seow C C. Methods for the study of starch retrogradation [J]. Food Chemistry, 2000, 71(1): 9-36.
- [20] Wang L F, Zhang L, Wang H L, et al. Insight into protein starch ratio on the gelatinization and retrogradation characteristics of reconstituted rice flour [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 3: 524-529.